

マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いた ビーム方向制御に関する研究 II

石川 峻樹[†] 篠原 真毅[†] 吉野 純樹[†]

[†] 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: [†] {i-takaki, shino, junki_yoshino}@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし 宇宙太陽光発電所(SPS)を実現するためには、高精度な送電マイクロ波のビーム制御を行う必要がある。京都大学では、宇宙太陽光発電に向けたマイクロ波無線電力伝送に関する研究のために、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを導入し、ビーム制御技術に関する研究を行っている。本論文では、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムに関して、ビーム方向を変化させた場合のアンテナパターンの測定実験及びシミュレーションによる評価について述べる。また、サブアレー化によるアンテナパターンの変化に関する測定実験についても述べる。

キーワード フェーズドアレーアンテナ, ビームフォーミング

Study on Beam Forming with Phased Array System for Microwave Power Transmission II

Takaki ISHIKAWA[†] Naoki SHINOHARA[†] and Junki YOSHINO[†]

[†] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: [†] {i-takaki, shino, junki_yoshino}@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract We have to achieve high beam direction control accuracy, in order to realize a solar power satellite/station (SPS). In Kyoto University, we study microwave power transmission (MPT) and solar power satellite (SPS) MPT system. We have an advanced phased array system to make experiments on beam forming with phased array. In this paper, we controlled the beam direction, and measured and simulated the antenna patterns of the advanced phased array system. In addition, we considered subarrays and measured the antenna patterns by using the advanced phased array system.

Keyword Phased array antenna, Beam forming

1. 研究背景

宇宙太陽発電所(Solar Power Satellite / Station: SPS)とは、静止衛星軌道に非常に大型の太陽発電衛星を建設し、発電した電力をマイクロ波無線電力伝送技術あるいはその他の無線電力伝送技術を用いることで、宇宙において発電した電力を地上で利用するという構想である。SPSは、1968年にアメリカにおいて提案された構想で[1]、日本においても実用化を目指し研究が進められている[2]。宇宙空間では、構造物を固定することが困難であるため、SPSの送電アンテナの向きは絶えず変化することとなり、また、36000 km離れた直径数 kmの受電設備に送電マイクロ波の電力を集中させる必要があることから、非常に高精度かつ高速なビーム制御を行う必要がある。そのため、送電用のアンテナとしては、フェーズドアレーアンテナを用いることが検討されている。フェーズドアレーアンテナとは、多数のアンテナ素子から構成され、各アンテナ素子か

らの放射の振幅と位相を制御することにより、任意のビームの形成が可能なアンテナである。そのため、フェーズドアレーアンテナはビーム方向制御を、アンテナの物理的な向きの制御ではなく、振幅や位相の制御といった電気的な制御によって行えるため、高精度かつ高速な制御が可能であり、SPSに適したアンテナであると言える。

現在、日本において、テザーSPSと呼ばれるタイプのSPSが提案され、検討が行われている[3][4]。テザーSPSとは、50 cm四方の送電一体型のパネルモジュールを最小ユニットとし、それらを多数接続することで、一辺の長さが約2.5 kmになるSPSを構成するモデルとなっている。テザーSPSでは、送電アンテナとして、比較的量産の容易なパッチアンテナを素子アンテナとしたフェーズドアレーアンテナを用いる。また、一枚のパネルには256個のアンテナが用いられる。

京都大学生存圏研究所では、フェーズドアレーアン

テナを用いた無線電力伝送に関する実験を行うことを目的とし、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを導入した。表 1 はシステムの構成を表しており、図 1 はシステムの外観を表している。各アンテナ素子がそれぞれに 5 bit デジタル移相器を持っており、放射位相を個別に制御することが可能である。一方で、各アンテナ素子からの出力は個別に制御を行うことはできず、すべてのアンテナ素子が一律な放射電力となる。本論文では高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いたビーム制御に関する実験及びシミュレーションの結果について述べる。

表 1 システムの構成

周波数	5.8 GHz
偏波	右旋円偏波
素子数	256
移相器	5 bit デジタル移相器
合計マイクロ波出力	最大 1.9 kW

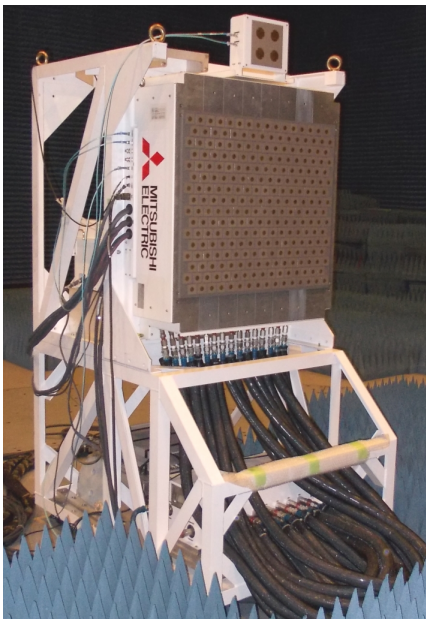


図 1 システムの外観

2. 測定実験及びシミュレーションの概要

京大生存圏研究所の高度マイクロ波電力伝送実験棟（Advanced Microwave Energy Transmission Laboratory: A-METLAB）において、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いたアンテナパターンの測定を行った。測定の風景の写真を図 2 に示す。測定は、フェーズドアレーと測定用アンテナを正対させた状態で配置した。このときフェーズドアレーはアンテナ面の中心が A-METLAB のターンテーブルの中心に重なるように配置し、測定用アンテナは保持用のラックに固定した。ただし、測定用アンテナの

中心の高さがフェーズドアレーの中心の高さと等しくなるように、測定用アンテナを設置した。以上のような設定において、ターンテーブルを回転させたときの測定アンテナにおける受電電力を測定することで、アンテナパターンを測定した。また、送受電アンテナ間の距離は、6.5 m としている。このとき、フェーズドアレーの一辺の大きさ D が約 80 cm、波長 λ が約 5.17 cm なので、 $(2D^2)/\lambda$ の値を計算すると約 24.8 m となることから、今回行ったフェーズドアレーアンテナパターンの測定は、フレネル領域での測定となっている。

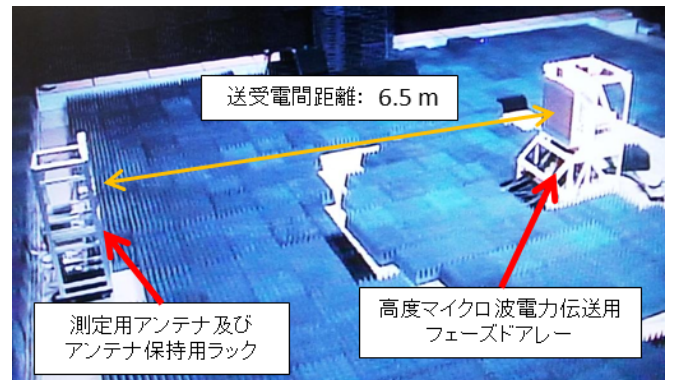


図 2 実験風景

シミュレーションには、3次元電磁界シミュレータ HFSS を用いて行っており、フェーズドアレーシステムの送電アンテナを模擬したモデルを仮定して行っている。

実験及びシミュレーションの座標系を図 3 に示す。図中の X 軸をアンテナの正面方向とし、アンテナパターンは θ 、 ϕ の 2 つの偏角を用いて表現している。ただし、 θ は X 軸、 ϕ は XY 平面と平行な場合を 0 度と設定した。また、実験はターンテーブルを回転させることで測定を行っていることから、 ϕ が 0 度の場合の H 面のアンテナパターンのみを測定している。

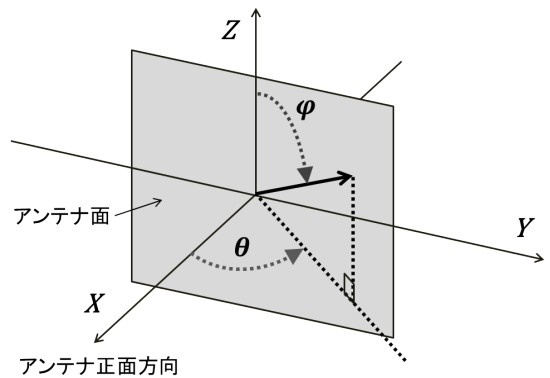


図 3 測定及びシミュレーションにおける座標系

3. 測定及びシミュレーションの結果

本章では、測定及びシミュレーションの結果について

て述べる．実験では，あらかじめ素子電界ベクトル回転法[5]を用いた位相較正を行っている．また各アンテナ素子の位相設定については，シミュレーションでは位相データをアナログ値で設定し，実験では位相器の関係から 5bit のデジタル値で設定を行うものとしている．

3.1. ビーム方向制御

本節では，メインローブの角度を変化させた場合のアンテナパターンについて，実験及びシミュレーションを用いて評価を行っている．

メインローブの角度を θ 方向に変化させた場合の結果を図 4 に示す．ただし，アンテナパターンについては，メインローブの角度が 0 度の際の最大のビーム強度を 0 dB として規格化を行った値を示している．図 4 は θ が 0 度および 10 度の場合の結果を示しており，図より，実際にメインローブ方向を制御できている様子が確認できる．

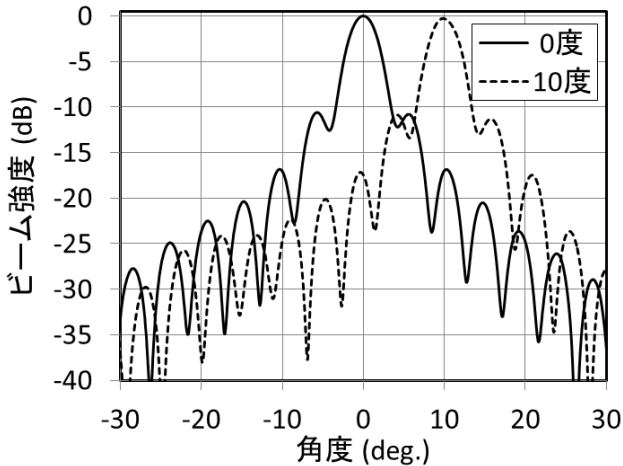


図 4 メインローブ方向を変化させた場合の実験結果

次に，メインローブ方向を変化させた場合のメインローブでの強度の変化を測定した結果を図 5 に示す．メインローブの角度が -20 度から 20 度までの場合には，強度の低下はほとんど見られず，エレメントパターンに従った強度低下のみが確認できる．一方で，角度の大きさが 20 度を超えると，強度の急激な低下が確認でき，角度の大きさが約 23 度となるあたりで，メインローブの強度が -3 dB となる．図 7，図 8 にメインローブの角度が 0 度， 30 度の場合のシミュレーションの結果を示した．図の縦軸，横軸はそれぞれ偏角 θ ， ϕ を表しており，図のカラーバーはビーム強度を表している．ビーム強度は，メインローブの角度が 0 度の場合の最大のビーム強度が 0 dB となるように規格化を行った値を示している．図 6 では，放射された電力がメインローブ方向に集中している様子が確認できるが，図 7 では，メインローブ方向以外においても，メ

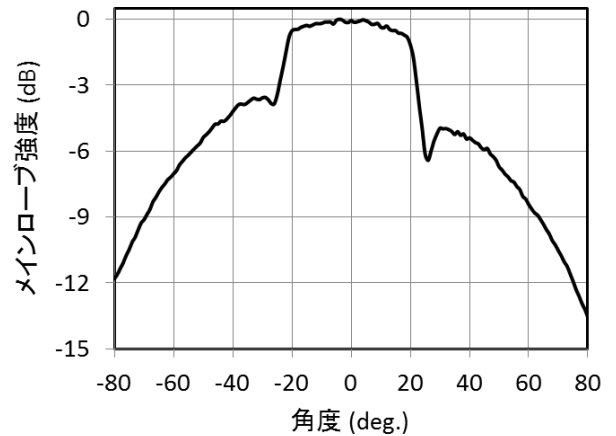


図 5 メインローブ方向を変化させた場合のメインローブの強度変化

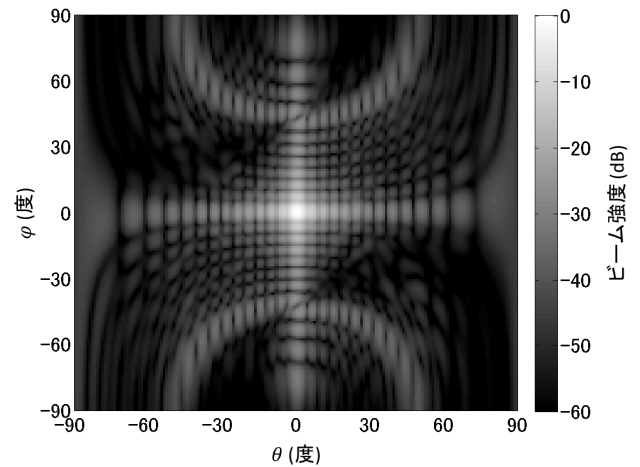


図 6 メインローブ方向が 0 度の場合のシミュレーションにおけるアンテナパターン

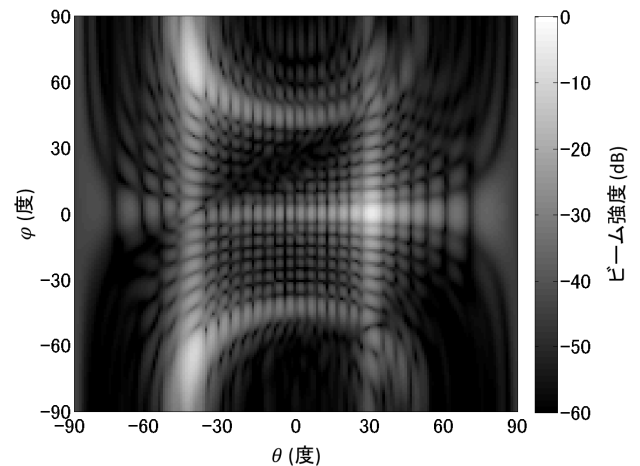


図 7 メインローブ方向が 30 度の場合のシミュレーションにおけるアンテナパターン

インローブの強度と同等程度の強度を持ったグレーティングローブが存在していることが確認できる。また、これらのグレーティングローブは ϕ の大きさが約 60 度程度の領域に存在しており、実験におけるターンテーブルを利用した測定では観測できていない。実験において、グレーティングローブの測定及び評価を行うことは今後の課題とする。

3.2. サブアレー化

SPS においては、位相器の数を減らすことによるコスト低下を目指して、各パネル状においてサブアレー化を行うことが検討されている。そこで、本研究でも、フェーズドアレーシステムにおいて、各アンテナ素子の位相の設定をサブアレー単位で変化させることにより、仮想的にサブアレー化した場合のアンテナパターンの測定を行った。サブアレー化は図 8 に示したように、 2×2 及び 4×4 の二種類について検討を行った。各アンテナ素子の位相については、サブアレー化したアンテナ素子の組み合わせの中心位置にアンテナ素子が存在する場合の出力位相を計算し、設定するものとした。

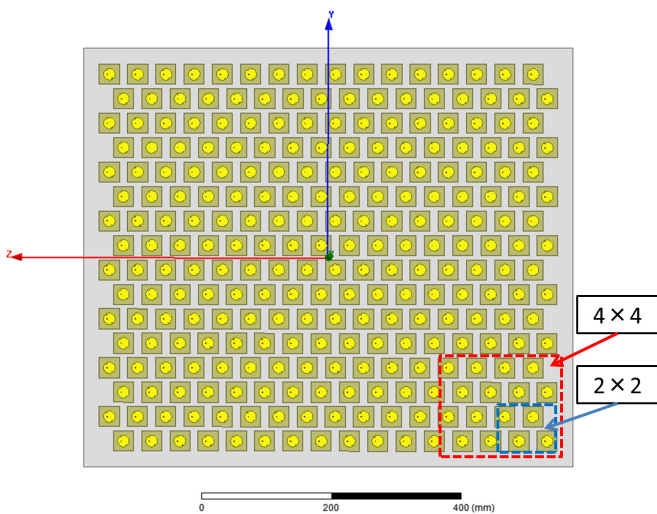


図 8 サブアレー化のモデル図

2×2 のサブアレーにおいて、メインローブの角度を 0 度、10 度に設定した場合のアンテナパターンを図 9 に示す。ただし、ビーム強度はメインローブの角度が 0 度の場合の最大値を 0 dB として規格化を行った値を示している。メインローブの角度が 0 度の場合のアンテナパターンは、サブアレー化を行っていない場合とほぼ同様のパターンとなっている。一方で、メインローブの角度が 10 度となった場合の結果では、メインローブの強度が約 -2 dB 程度まで低下しており、サブアレー化を行っていない場合よりも小さな値となっている。このとき、 -23 dB のあたりにやや大きなサイドローブが発生していることが確認できる。また、メインローブ方向を変化させた場合のメインローブ強度の

変化を図 9 に示す。メインローブの強度が -3 dB となるのは、メインローブの角度の大きさが約 15 度となる場合であった。サブアレー化を行っていない場合には約 23 度だったことから、メインローブの角度を大きくした場合の、メインローブ強度の低下がサブアレー化を行うことによって大きくなっていることが確認できる。

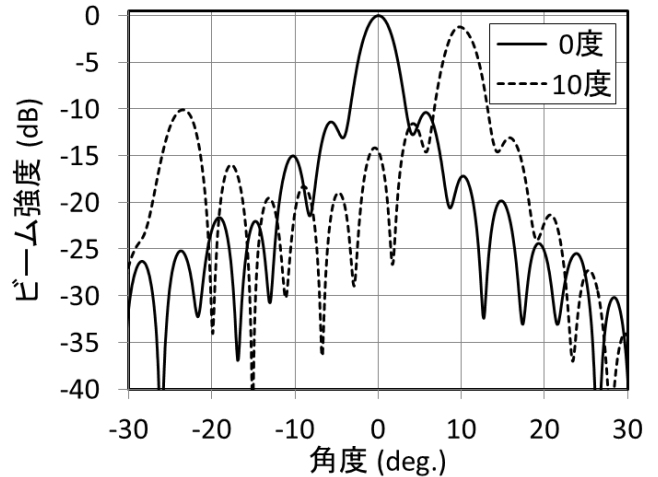


図 9 2×2 のサブアレーにおいてメインローブ方向を変化させた場合の実験結果

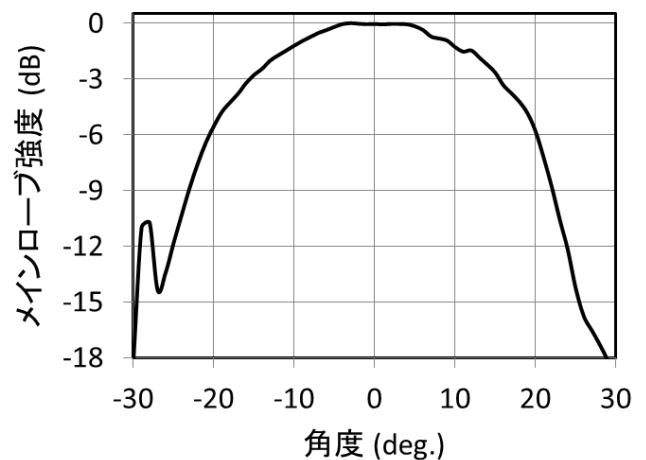


図 10 2×2 のサブアレーにおいてメインローブ方向を変化させた場合のメインローブの強度変化

4×4 サブアレーにおいて、メインローブの角度を 0 度、10 度に設定した場合のアンテナパターンを図 11 に示す。ただし、ビーム強度はメインローブの角度が 0 度の場合の最大値を 0 dB として規格化を行った値を示している。メインローブの角度が 0 度の場合のアンテナパターンは、サブアレー化を行っていない場合とほぼ同様のパターンとなっている。一方で、メインローブの角度が 10 度となった場合、メインローブの強度は約 -5 dB となり、また -7 度の方向にピークのビーム強度が約 -3 dB のグレーティングローブが発生し

ていることが確認できる。メインローブ方向を変化させた場合のメインローブ強度の変化を図 12 に示す。メインローブの強度が -3 dB となるのは、メインローブの角度の大きさが約 7 度となる場合であった。サブアレー化を行っていない場合や 2×2 のサブアレー化を行った場合と比較して、メインローブの角度を大きくした場合のメインローブ強度の低下がより、大きくなっていることが確認できる。

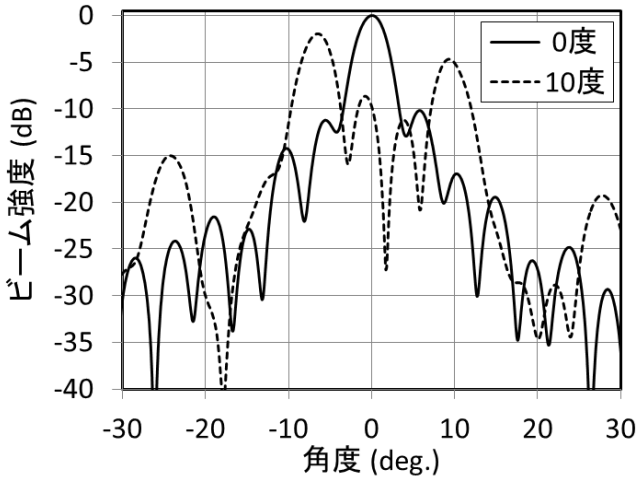


図 11 4×4 のサブアレーにおいてメインローブ方向を変化させた場合の実験結果

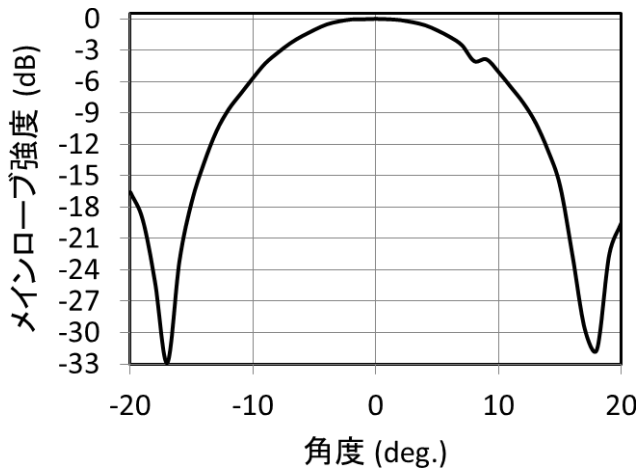


図 12 4×4 のサブアレーにおいてメインローブ方向を変化させた場合のメインローブの強度変化

サブアレー化を行っていない場合、 2×2 のサブアレー化を行った場合、 4×4 サブアレー化を行った場合の三種類について、メインローブ方向を変化させた場合のメインローブ強度の変化の比較を図 13 に示す。図 13 より、サブアレー化を行う又はサブアレーのサイズを大きくすることにより、メインローブの角度の大きさを大きくした場合のメインローブ強度の低下が大きくなっていることが確認できる。メインローブ強度が -3 dB となるメインローブの角度の大きさが、サブ

アレー化を行っていない場合、 2×2 のサブアレー化を行った場合、 4×4 のサブアレー化を行った場合で、それぞれ約 26 度、 15 度、 7 度となっており、サブアレーのサイズに反比例するように小さくなっている。実際に SPS におけるサブアレーの運用等を考慮する場合は、各送電パネルから見た受電施設の方向角をどの程度まで制御することが可能かを十分に検討する必要があることが分かる。またこのとき、SPS から見た受電施設の位置以外に、パネル接続部の可動性によって発生する、パネル角度の変化も考慮する必要がある。

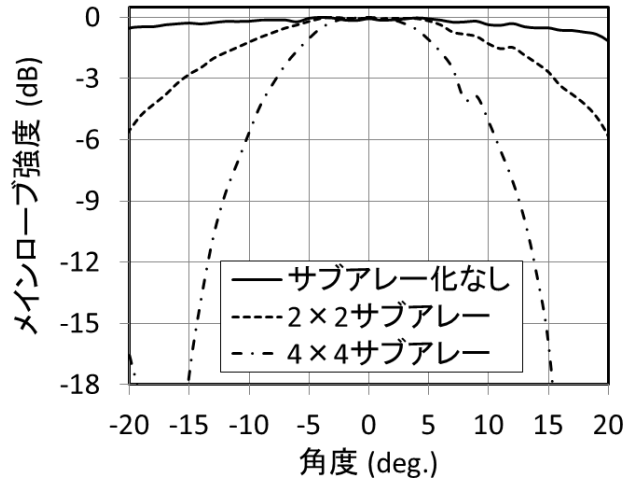


図 13 サブアレー化の有無及びサイズによる、メインローブ方向を変化させた場合のメインローブの強度変化の比較

4. まとめと今後の予定

今回の検討では、SPS のフェーズドアレーについて、メインローブ方向を変化させた場合のビーム強度の変化を、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いた測定実験及び電磁界シミュレータを用いたシミュレーションにより検討した。メインローブの角度が -20 度から 20 度までの場合には、強度の低下はほとんど見られないが、メインローブの角度の大きさが 20 度を超えると、グレーティングローブの発生による急激なビーム強度の低下が確認できた。

また、 2×2 及び 4×4 のサブアレーを導入した場合についても検討を行い、サブアレー化によるメインローブの強度の影響についても検討を行った。サブアレー化によりメインローブが -3 dB となる角度がサブアレーのサイズに反比例するように小さくなる様子が確認できた。

今回行った測定では、H 面におけるアンテナパターンのみを測定していたが、今後はより詳細な検討を行うために、2 次元方向でのアンテナ測定についても行う必要がある。

文 献

- [1] P. E. Glaser, "Power from the Sun: Its Future," *Science*, vol.162, no.2856, pp.857-886, 1968.
- [2] H. Matsumoto, "Research on Solar Power Satellites and Microwave Power Transmission in Japan," *IEEE Microwave Magazine*, Vol.3, no.4, pp.36-45, Dec. 2002.
- [3] S. Sasaki, K. Tanaka, K. Higuchi, N. Okuizumi, S. Kawasaki, N. Shinohara, K. Senda, and K. Ishimura, "A New Concept of Solar Power Satellite : Tethered-SPS," *Acta Astronautica*, Vol.60, pp.153-16, Jul. 2006.
- [4] (財)無人宇宙実験システム研究開発機構, "平成 19 年度太陽光発電利用促進技術調査成果報告書," Mar. 2008.
- [5] 真野清司, 片木考至, "フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法—素子電界ベクトル回転法—," *信学論 (B)*, vol.J65-B, no.5, pp.555-560, 1982.